

## Дослідження теплопровідності ущільненої маси цілих автошин та визначення оптимального їх розташування в піролізному реакторі

С. С. Рижков, Л. М. Маркіна, М. В. Рудюк

*Досліджено температурне поле в об'ємі ущільненої суміші компонентів цілих автошин в реакторі. Проаналізовано залежності між геометричними параметрами структури вихідної автошини і концентрацією компонентів елементарної ячійки з бортовими кільцями в об'ємі термопластичної гуми при змінній температурі та навантаженні. Досліджено вплив металевих бортових кілець зі збільшеною теплопровідністю на загальну теплопровідність масиву автошин в піролізному реакторі*

*Ключові слова: піролізний реактор, теплопровідність ущільненої маси гуми автошин разом з бортовими кільцями, цілі відпрацьовані автошини, тепловий опір*

### 1. Вступ

Основною особливістю універсальної автоматизованої технології безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин (БЦШ), є те, що в процесі піролізу автошини ущільнюються задля підвищення теплопровідності. Як показали попередні дослідження конструктивних особливостей піролізного реактора [1], за рахунок стискання цілих автошин в реакторі і високої теплопровідності металевих бортових кілець, загальна теплопровідність масиву автошин в реакторі збільшується в 70 раз, що забезпечує високу інтенсивність теплообміну всередині піролізного реактора і ефективного проведення ендотермічних хімічних перетворень, що в 2–3 рази збільшує продуктивність процесу.

Актуальність даної роботи полягає в теоретичному дослідженні раціонального розміщення масиву автошин в реакторі та дослідженні температурних полів при різній комбінації компонентів автошини в реакторі, та оцінюванні їх впливу на загальну теплопровідність ущільненої маси цілих зношених автошин під дією температури і навантаження.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відомі технології утилізації гуми автошин трудомісткі і енергозатратні, оскільки передбачають необхідність, по-перше, порізка автошин з використанням високовартісного обладнання [2], або подрібнення за специфічними складними методиками [3], або застосування енергоємних технологічних процесів [4]. По-друге, використання взаємозамінних реторт, що приводить до необхідності роботи в циклічному режимі з великими втратами тепла, нагрів – охолодження [5], при цьому використовується ручна праця при вивантаженні і завантаженні реактору [6], або додаткове використання коштовних каталізаторів [7]. По-третє, коефіцієнт заповнення реактора автошинами не перевищує 60 % при

малій теплопровідності маси гуми в реторті, що супроводжується малою продуктивністю технологічного обладнання [8].

Перенос тепла суттєво залежить від долі компонентів в одиниці об'єму реактора гуми та повітря, які мають низьку теплопровідність, і долі бортових металевих кілець з порівняно високою теплопровідністю [9]. Тому загальна теплопровідність автошини в радіальній площині на різних етапах піролізу буде визначатися теплопровідністю запропонованої моделі комбінованої ячійки з усередненими параметрами.

Відомі конструкції і технології піролізу для здійснення процесу утилізації автошин не забезпечують високоефективний нагрів сировини в реакторі [10].

Відомі конструкції і технології піролізу для здійснення процесу утилізації автошин не забезпечують високоефективний нагрів сировини в реакторі [11]. Низька теплопровідність гуми, що входить до складу покришок, обумовлює високі енергетичні витрати на проведення процесу, що призводить до збільшення вартості переробки і обмежує впровадження піролізних технологій в промисловому масштабі [12].

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Метою дослідження є проведення теоретичних розрахунків загальної теплопровідності анізотропних структур бінарних ячійок, які складаються з гуми цілої автошини та розташованими в ній металевими бортовими кільцями, в залежності від їх об'ємної концентрації та геометричного розташування для забезпечення максимальної теплопровідності масиву цілих автошин різного діаметру відносно один одного.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- вибір раціональних анізотропних структур бінарних ячійок, які максимально наближалися до реалістичних умов оцінки теплопровідності масиву цілих автошин в піролізному реакторі;
- розробка методики теоретичних розрахунків теплопровідності різних структур бінарних ячійок і визначення їх впливу на теплопровідність даного середовища;
- теоретична оцінка впливу збільшеної теплопровідності металевих бортових кілець на загальну теплопровідність масиву цілих автошин в піролізному реакторі;
- визначення оптимального геометричного розташування цілих автошин відносно піролізного реактора.

### **4. Матеріали і методи дослідження теплопровідності в середині реактору**

Загальна теплопровідність масиву автошин в зонах реактора можна виразити як:

$$c(u, r, t) \frac{du}{dt} = \text{div}[\lambda(u, r, t) \text{gradu}] + q(u, r, t), \quad (1)$$

де  $u$  – температура,  $c$  – питома об'ємна теплоємність,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $q$  – щільність джерела тепла зовнішнього обігріву реактора,  $r, t$  – координати.

Оскільки внутрішнє джерело тепла в реакторі відсутнє, то рівняння можна записати так:

$$c'(T) \frac{dt}{d\tau} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad}(T)]. \quad (2)$$

Враховуючи, що відомі конструкції реакторів в основному представляють собою тіло обертання, то для теоретичних досліджень доцільно використовувати циліндричну систему координат.

Автошини разом з реактором представляють собою тіло обертання, то доцільно використовувати циліндричну систему координат. Разом з тим, з метою підвищення точності рішення для першої і другої зони доцільно використовувати сферичну систему координат [13].

Рівняння теплопровідності для зон нагріву в сферичній системі координат наступне:

$$c'(T) \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} (\lambda(T) r^2 \frac{dT}{dr}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} (\lambda(T) \frac{dT}{d\theta}). \quad (3)$$

Рівняння теплопровідності для ущільненого масиву компонентів автошин в III зоні деструкції можна представити в циліндричній системі координат:

$$c'(T) \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (\lambda(T) r \frac{dT}{dr}) + \frac{d}{dz} \cdot (\lambda(T) \frac{dT}{dz}), \quad (4)$$

де  $r, z$  – циліндричні координати;  $r, \theta$  – сферичні координати;  $T$  – температура;  $\tau$  – час,  $c = \rho c$  – питома об'ємна теплоємність;  $\rho$  – щільність суміші компонентів автошини в третій зоні;  $c$  – питома масова теплоємність [14].

Для спрощення розрахунків теплопровідності при допустимій похибці будь-яка багатокомпонентна система може бути послідовно зведена до двокомпонентної, при відповідних граничних умовах. При виборі моделі приймаються наступні припущення і обмеження: матеріал гуми є термопластичним і має однорідну структуру, металокордом нехтуємо, матеріал бортових кілець – однорідний метал, розташований в площині, перпендикулярній тепловому потоку. Симетрична модель автошини і розташування її в піролізному реакторі з урахуванням прийнятих припущень представляє собою набір окремих компонентів, із яких складається автошина і їх співвідношення в одиниці об'єму на кожному із етапів піролізу (рис. 1, 2).

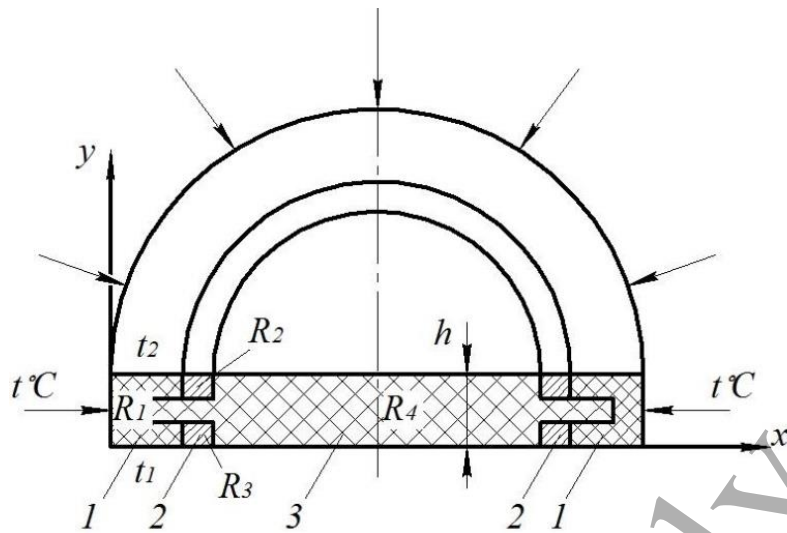


Рис. 1. Комбінована ячійка автошини в першій і другій зонах реактора: 1 – елемент гуми; 2 – елемент металу (бортових кілець); 3 – елемент повітря або димових газів;  $R_1$ - $R_4$  – теплові опори гуми та металевих бортових кілець в областях, які досліджуються

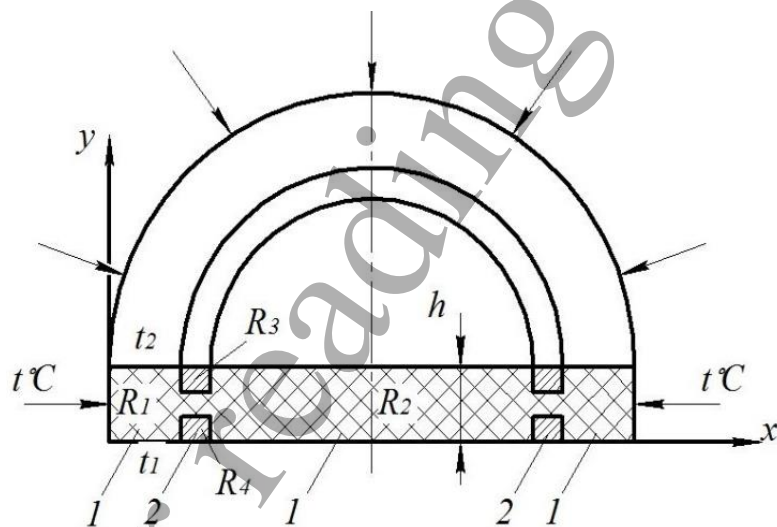


Рис. 2. Комбінована ячійка шару автошини в третій зоні реактора: де 1 – елемент гуми; 2 – елемент металу (бортових кілець); 3 – елемент повітря або димових газів

Основою елементарної ячійки є ізотермічне стискання, яке характеризується зміною об'єму при постійній температурі і плавленням термопластичної гуми при постійному тиску.

Оскільки комбінована ячійка цілої автошини являється симетричною відносно вісі, то розглядається елементарна ячійка, тепловий опір якої дорівнює  $1/2$  частини комбінованої ячійки з теплопередачею в перпендикулярній площині. Розглянемо перенесення тепла в елементарній ячійці шару автошини з урахуванням теплових опорів на окремих участках моделі автошини (рис. 3, 4).

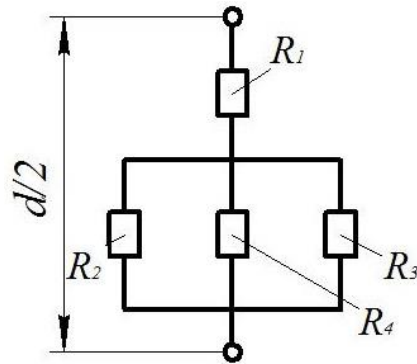


Рис. 3. Схема з'єднань теплових опорів в елементарній ячійці кожного шару половини автошини в першій і другій зонах реактора:  $R_1$  – тепловий опір гуми;  $R_2$  і  $R_3$  – тепловий опір металевих бортових кілець;  $R_4$  – тепловий опір повітря або димових газів

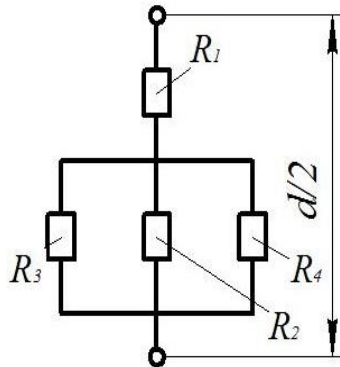


Рис. 4. Схема з'єднань теплових опорів в елементарній ячійці кожного шару ущільненої половини автошини в третій зоні реактора:  $R_1$  – тепловий опір термопластичної гуми;  $R_2$  – тепловий опір термопластичної гуми в центрі бортових кілець  $R_3$  і  $R_4$  – тепловий опір металевих бортових кілець

Загальний опір елементарної ячійки згідно схем на рис. 3 і 4 визначається як:

$$R = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}. \quad (5)$$

Для обох схем формула  $R$  однакова, в наявності компонента димових газів ( $R_4$ ) в схемі (рис. 3), який в подальшому витісняється термопластичною гумою ( $R_2$ ) в схемі (рис. 4).

При опису процесу переносу тепла в багатокомпонентній моделі необхідно встановити залежність ефективного коефіцієнту узагальненої теплопровідності  $\theta$  від структури ячійки, коефіцієнтів узагальненої теплопровідності компонентів  $\theta_i$  і їх концентрації  $m_i$ , тоді:

$$\theta = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, m_1, m_2, \dots, m_i). \quad (6)$$

Теоретичне дослідження процесу теплопереносу виконується на ідеалізованій моделі структури, яка відображає основні геометричні характеристики реальної ячійки автошини враховуючи всі істотні фактори, які визначають процес теплопереносу. Таку модель можна вважати адекватною реальній системі [14].

## 5. Результати досліджень теплопровідності маси сировини відпрацьованих цілих шин

Проведено дослідження трьох варіантів найпростішої ячійки системи компонентів автошин в реакторі з подальшим порівнянням її розрахункових величин теплопровідності з експериментальними даними. Кожен варіант відрізняється граничними умовами, які характеризують склад і структуру ячійки, при умові повної термопластичної деформації автошини під дією температури і навантаження та при відсутності повітря.

Спочатку досліджується варіант симетричної структури ячійки, яка еквівалентна масиву подрібнених автошин з видаленням бортових кілець; тепловий потік розповсюджується тільки в радіальному напрямку в об'ємі однорідного матеріалу (гуми) в системі координат  $(x, y)$  (рис. 5).

В першому варіанті симетрична структура ячійки – однорідна термопластична гума; впливом металевих бортових кілець на температурне поле ячійки нехтуємо; тепловий потік розповсюджується тільки в радіальному напрямку.

Розглядається найпростіша ячійка системи автошини, заповненої по діаметру реактора однорідним матеріалом (гумою) в системі координат  $(x, y)$  (рис. 5).

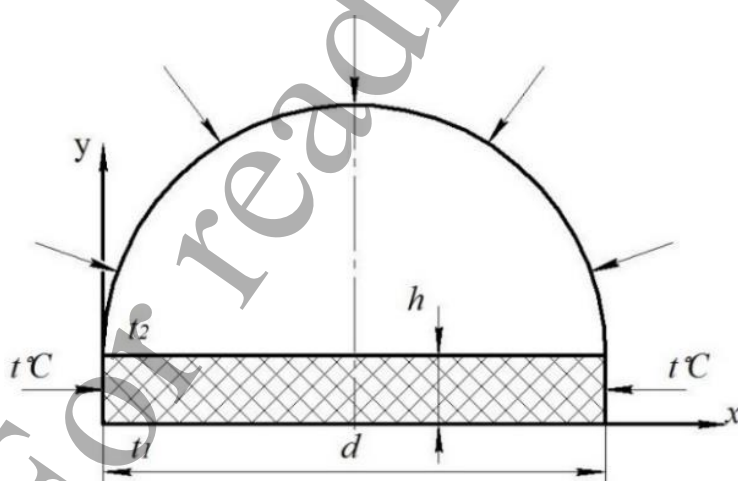


Рис. 5. Елементарна ячійка автошини заповненої однорідним матеріалом

Лінії переносу тепла на поверхні  $x=1/2d$  в елементарній ячійці являються ізотермічними, а  $y=h$  адіабатичними. Температури на поверхнях позначаються  $x=0$  і  $x=1/2d$  через  $t(x,0)=t'$ ,  $t(x,h)=t''$ , а тепловий потік, який проходить через ізотермічну поверхню елементарної ячійки, через  $Q$ . Оскільки поверхня  $x=0$  є ізотермічною, то її температури  $t_1$  і  $t_2$  рівні між собою, тоді:

$$t_1|_{x=0} = t_2|_{x=0} = t'. \quad (7)$$

Тепловий опір  $R$  елементарної ячійки визначається як:

$$R = \frac{t' - t''}{Q} = \frac{|t_1|_{x=0} |t_2|_{x=\frac{1}{2}d}}{Q}. \quad (8)$$

Якщо ввести поняття ефективної теплопровідності  $\lambda$  елементарної ячійки, то її тепловий опір знаходиться при умові  $x=0$  і  $x=1/2d$  рівними  $1/2d$ , а висота ячійки  $h$ :

$$R = \frac{\frac{1}{2}d}{\frac{1}{2}d\lambda} = \frac{1}{\lambda}. \quad (9)$$

При об'єднанні двох формул для  $R$  одержується:

$$\lambda = \frac{Q}{|t_1|_{x=0} |t_2|_{x=\frac{1}{2}d}}. \quad (10)$$

Для визначення ефективної теплопровідності необхідно проаналізувати температурне поле системи ячійки.

$1/2$  ячійки розбивається на три частини  $0 \leq x \leq h$ ,  $0 \leq y \leq h$  позначається через  $t_2$ , температура області  $h \leq x \leq 1/2d$ ,  $0 \leq y \leq h$  – через  $t_1'$ , температуру області  $0 \leq x \leq 1/2d$ ,  $h \leq y \leq 1/2d$  – через  $t_1''$ .

Температурне поле указаних областей описується диференціальними рівняннями:

$$\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq h, \quad 0 \leq y \leq h; \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 t_1'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1'}{\partial y^2} = 0 \quad h \leq x \leq \frac{1}{2}d, \quad 0 \leq y \leq h; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 t_1''}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1''}{\partial y^2} = 0 \quad 0 \leq x \leq \frac{1}{2}d, \quad h \leq y \leq \frac{1}{2}d. \quad (13)$$

При граничних умовах:

– адіабатичності поверхонь  $y=0$  і  $y=1/2d$

$$\left(\frac{\partial t_2}{\partial y}\right)|_{y=0} = \left(\frac{\partial t_1''}{\partial y}\right)|_{y=0} = 0; \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial t_1'}{\partial y}\right)|_{y=\frac{1}{2}d} = \left(\frac{\partial t_1''}{\partial y}\right)|_{y=\frac{1}{2}d} = 0; \quad (15)$$

– ізотермічності поверхні  $x = 0$

$$t_2|_{x=0} = t_1'|_{x=0} = t'. \quad (16)$$

Умови рівності температур і теплових потоків на границях між областями наступні:  $t_2|_{x=h} = t_1'|_{x=h}$ ;  $t_2|_{x=h} = t_1''|_{x=h}$ .

$$\left(\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial y}\right)|_{y=h} = \left(\lambda_2 \frac{\partial t_1'}{\partial y}\right)|_{y=h}, \quad (17)$$

$$\left(\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}\right)|_{x=h} = \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1''}{\partial x}\right)|_{x=h}, \quad (18)$$

$$t_1'|_{y=h} = t_1''|_{y=h},$$

$$\left(\frac{\partial t_1'}{\partial x}\right)|_{x=h} = \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1''}{\partial x}\right)|_{x=h}. \quad (19)$$

Вирішуючи систему рівнянь разом з умовами на границях визначено температурне поле  $t_1(x,y)$  і  $t_2(x,y)$ , а також тепловий потік:

$$Q = -\lambda_1 \int_0^{\frac{1}{2}d} \left(\frac{\partial t_1}{\partial y}\right) \Big|_{y=\frac{1}{2}d} dx. \quad (20)$$

Знаючи вираз  $t_1(x,y)$  та  $Q$  можна знайти аналітичне значення для узагальненої теплопровідності елементарної ячійки по формулі:

$$\lambda = \frac{Q}{|t_1|_{x=0} - |t_2|_{x=\frac{1}{2}d}}. \quad (21)$$

Представлена формула теплопровідності елементарної ячійки дозволяє дати узагальнену оцінку теплопровідності масиву ущільненої гуми в піролізному реакторі, без металевих елементів, присутніх в конструкції автошини.



Розрахункова залежність теплопровідності елементарної ячійки заповненою термопластичною гумою при різних температурних перепадах в прийнятій ячійці для першого варіанту представлена на рис. 6.

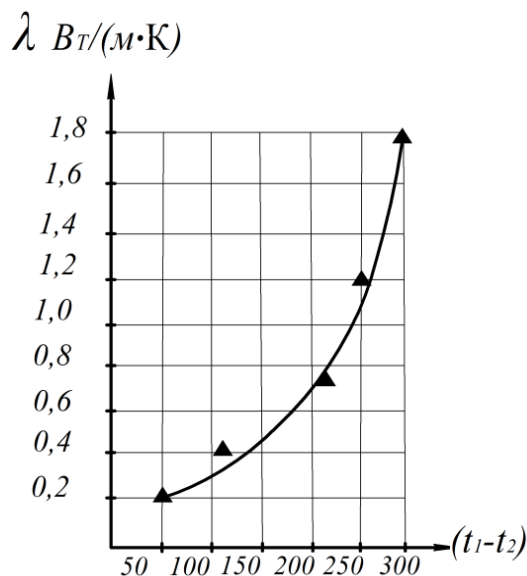


Рис. 6. Розрахункова залежність теплопровідності елементарної ячійки

З рис. 6 видно, що теплопровідність монокомпонентної термопластичної гуми не перевищує 1,5 Вт/(м·К) і мало змінюється від перепаду температур в паралельній площині теплового потоку. Одержана розрахункова характеристика теплопровідності за похибки більше 50 % не може використовуватися для аналізу бінарних систем з великим діапазоном вихідної теплопровідності компонентів, які характерні для ущільнених автомобільних шин, а це не дозволяє забезпечити реальну оцінку температурного поля в середині реактора. Оскільки газова порожнина є проміжним елементом, то в подальшому, при аналізі залежності між геометричними параметрами структури і концентрацією компонентів, приймається за основу двокомпонентна структура автошини (рис. 5, 6).

В *другому варіанті* розглядається симетрична бінарна структура двокомпонентної ячійки (термопластична гума з бортовими кільцями), умовно приймається, що перетин бортового кільця квадратний. Комбінована ячійка представлена у вигляді куба, верхня і нижня грані куба – ізотермічні поверхні, а бокові грані – адіабатні (рис. 7).

Для моделювання вводяться наступні позначення:  $\delta$  – половина ширини бортового кільця автошини;  $V$ ,  $V_1$ , і  $V_2$  – об'єми елементарної ячійки та її компонентів (бортового кільця та термопластичної гуми);  $L$  – довжина ребра куба,  $C = \delta/L$  – відносний розмір бортового кільця [16]. Залежність між параметром  $C$ , який характеризує геометричні параметри бортового кільця, і об'ємом гуми, в якій він знаходиться, визначається:

$$m_1 = \frac{V_1}{V}; m_2 = \frac{V_2}{V} = \frac{V - V_1}{V} = 1 - m_1; V = V_1 + V_2, \quad (22)$$

$$V^3 - [\delta^3 + 3\delta^2(L - \delta)] = 2\delta^3 - \delta^2L + L^3, \quad (23)$$

$$m_2 = 2C^3 - 3C^2 + 1. \quad (24)$$

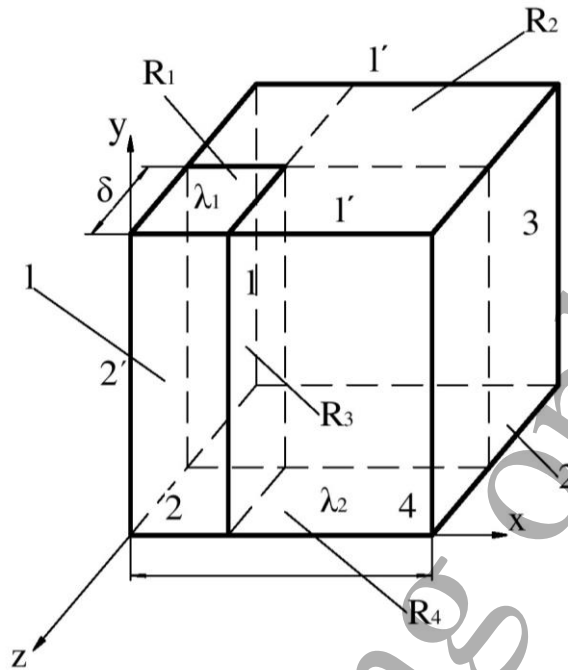


Рис. 7. Елемент частини комбінованої бінарної ячійки: 1 – половина металевого бортового кільця; 2 – комбінована ячійка

При введенні нової змінної  $y=C-1/2$ , рівняння  $m_2$  представляється у вигляді:

$$y^2 + 3py = 2q = 0, \quad q = \frac{1-2m_2}{8}, \quad p = -\frac{1}{4}. \quad (25)$$

Число дійсних рішень даного рівняння залежить від знаку дискримінанти  $D$  квадратного тричлена  $ax^2+bx+c$ , який дорівнює  $b^2-4ac$ .

$$D = q^2 + p^3 = \left(\frac{1-2m_2}{8}\right)^2 - \left(\frac{1}{4}\right)^3 = \frac{m_2(m_2-1)}{16} \leq 0. \quad (26)$$

Для  $D>0$  рівняння  $y^2 + 3py + 2q = 0$  має три дійсних корені:

$$y_1 = -\cos\frac{\phi}{3}; y_2 = \cos(60^\circ - \frac{\phi}{3}); y_3 = \cos(60^\circ + \frac{\phi}{3}), \quad (27)$$

при чому  $0 \leq m_2 \leq 0,5$   $\phi = \arccos(1-2m_2)$ , а при  $0,5 < m_2 \leq 1$ ,  $\phi = \arccos(2m_2-1)$ .

Відносний розмір бортового кільця  $C=\delta/L$  в прийнятій моделі змінюється в межах  $0 \leq C \leq 1$ , а  $i$  і  $y_i$  пов'язані залежністю  $y=C-1/2$ .

Аналіз  $y_2$  показує, що другий його корінь приводить до значення  $C_2$ , яке або більше одиниці, або негативне. Перший корінь  $y_1$  дає фізично оправдані результати для  $C_1$  в усьому діапазоні змін  $0 \leq m_2 \leq 1$ , якщо значення кута  $\varphi$  береться з останньої чверті  $270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ . Аналогічні результати одержуються при використанні третього кореню  $y_3$ , якщо значення  $\varphi$  береться в першій чверті  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ . В подальшому для розрахунку параметра  $C$  використовується перший корінь рівняння (24), тоді:

$$C = 0,5 + A \cos \frac{\varphi}{3}, 270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ, \quad (28)$$

при  $0 \leq m_2 \leq 0,5$   $A = -1$ ,  $\varphi = \arccos(1 - 2m_2)$ , а при  $0,5 < m_2 \leq 1$   $A = 1$ ,  $\varphi = \arccos(2m_2 - 1)$ .

Аналіз процесу переносу тепла в елементі двохкомпонентної комбінованої ячійки виконується з урахуванням раніше описаної залежності між геометричними параметрами структури і концентрацією компонентів в ній. Площини  $1'-1'$  і  $2'-2'$  являються адіабатними, які розташовано паралельно загальному напрямку потоку тепла і боковим граням ячійки, розділяють останню на окремі участки 1–4 (рис. 7).

Теплові опори окремих участків елементарної ячійки  $R_i$  відображаються в формулах для плоскої стінки (рис. 8):

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \delta^2}, \quad R_2 = \frac{\delta}{\lambda_1 \delta (L - \delta)}, \quad (29)$$

$$R_3 = \frac{L - \delta}{\lambda_2 \delta (L - \delta)}, \quad R_4 = \frac{L}{\lambda_2 (L - \delta)^2}. \quad (30)$$

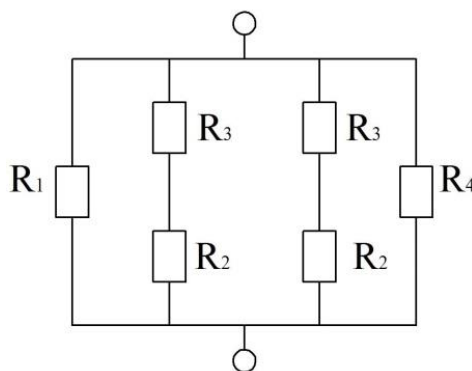


Рис. 8. Схема з'єднань теплових опорів в елементі частини комбінованої ячійки

Загальний еквівалентний тепловий опір комбінованої ячійки ( $R$ ) в цьому випадку можна представити наступним чином:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4}. \quad (31)$$

Таким чином, загальний тепловий опір з ефективною теплопровідністю  $\lambda$  представлений як:

$$R = \frac{1}{\lambda L^2} = \frac{1}{\lambda L}, \quad (32)$$

де  $\nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ .

Прирівнюючи (31) і (32) з урахуванням (30) можна одержати формулу ефективної теплопровідності структури ячійки автошини з комбінацією двох компонентів термопластичної гуми з теплопровідністю  $\lambda_1$  і металевих бортових кілець з теплопровідністю  $\lambda_2$ :

$$\lambda = \lambda_1 \left[ C^2 + \nu(1 - C)^2 + 2\nu C(1 - C)^2(\nu C + 1 - C)^{-1} \right]. \quad (33)$$

Представлена залежність відображає вплив теплопровідності кожного компоненту від його концентрації в одиниці об'єму на загальну теплопровідність елементарної ячійки (рис. 9).

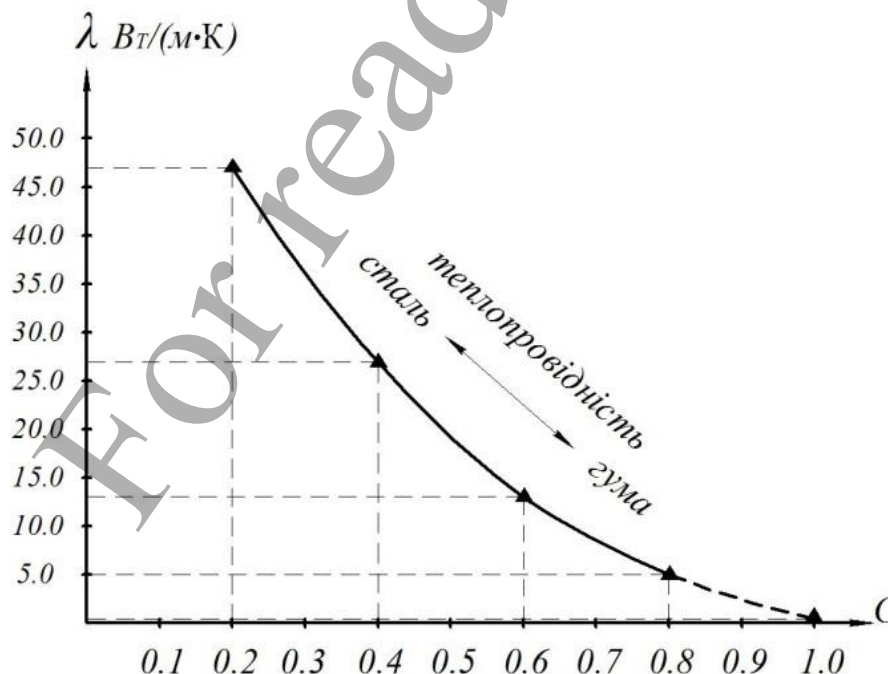


Рис. 9. Розрахункова залежність уточненої теплопровідності бінарної елементарної ячійки (варіант 2)

Враховуючи, що вихідна теплопровідність гуми  $\lambda_1=0,13$  Вт/(м·К), а металу  $\lambda_2=58$  Вт/(м·К), то загальна теплопровідність маси автошин в реакторі не перевищує 0,18 Вт/(м·К).

Аналізуючи результати теоретичних розрахунків, варіантів 1, 2, видно, що теплопровідність в середині реактора при симетричному розташуванні автошин і їх компонентів відносно циліндричного реактора має низьке значення і не перевищує 0,18 Вт/(м·К), що не є оптимальним варіантом.

Розглянемо *третій варіант*, коли діаметр реактора більший за діаметр автошин, які в нього завантажуються, мінімум в 1,5 рази, при цьому автошини разом з бортовими кільцями зміщуються один відносно другого, утворюючи несиметричну систему розподілу металевих бортових кілець у вигляді об'ємної металевої решітки.

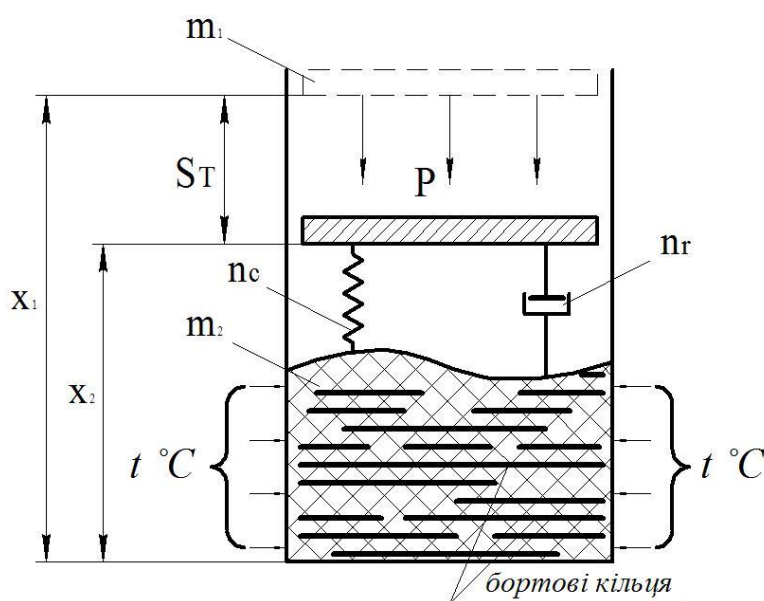


Рис. 10. Фізична модель процесу динамічного стиснення автошин в піролізному реакторі при несиметричній схемі розташування автошин відносно вісі циліндричного реактора

Несиметричне горизонтальне розташування бортових кілець з великою теплопровідністю і зміщених в перетині реактора один відносно другого забезпечують шунтування порівняно малої теплопровідності гуми.

В *третьому варіанті* проведено теоретичні дослідження в більш реалістичних умовах розташування ущільненої маси автошин відносно реактора з уточненням оцінки загальної теплопровідності анізотропної несиметричної структури елементарної ячійки з компонентами гуми і бортових кілець (рис. 11).

Об'єм даного елементу характеризується коефіцієнтом заповнення піролізного реактора металевими включеннями до 98 % (бортовими кільцями і металокордом автошин) і гумою.

Розглядається несиметрична структура бінарної ячійки, яка складається з термопластичної гуми та з двох бортових кілець. Компоненти в загальній стру-

ктури є анізотропними і мають різні властивості; в анізотропній несиметричній структурі компонент – бортові кільця круглої форми.



Рис. 11. Елемент моделювання піролізного реактора з об'ємною решіткою утвореною бортовими кільцями і металокордом автошин під дією статичного навантаження

З фізичної моделі (рис. 10, 11) виділяється орієнтована система розташування компонентів елементарної несиметричної ячійки і представлено її 1/8 частину (рис. 12, 13). Подальший аналіз проводиться на основі подрібнення елементарної ячійки безкінечно тонкими адіабатними вертикальними площинами (паралельно тепловому потоку) площинами  $a, б, в, г, д$  на характерні області 1, 2, 3. В цих областях теплові опори позначаються через  $R_1, R_2, R_3$ . Величини цих опорів обчислюються по формулам для плоских стінок:

$$R_1 = \frac{L_x}{\lambda_1(L_y L_z - l_y l_z)}, \quad R_2 = \frac{L_x - l_x}{\lambda_1 L_y L_z}, \quad R_3 = \frac{l_x}{\lambda_2 l_y l_z}, \quad (34)$$

де  $L_x, L_y, L_z, l_x, l_y, l_z$  – відповідні розміри ячійки із термопластичної гуми і відповідно бортового кільця;  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності відповідно гуми і металевого бортового кільця.

Згідно рис. 13 загальний опір ( $R$ ) розраховується по формулі:

$$R_{23} = R_2 + R_3, \quad R = \frac{R_1 R_{23}}{R_1 + R_{23}}. \quad (35)$$

Із формул (35) і (36) знайдемо  $R_{23}$ :

$$R_{23} = \frac{l_x \lambda_1 + \lambda_2 (L_x - l_x)}{l_y l_z \lambda_1 \lambda_2}, \quad (36)$$

і визначимо формулу для теплового опору  $R$  для всієї ячійки

$$R = \frac{L_x}{\lambda L_y L_z}. \quad (37)$$

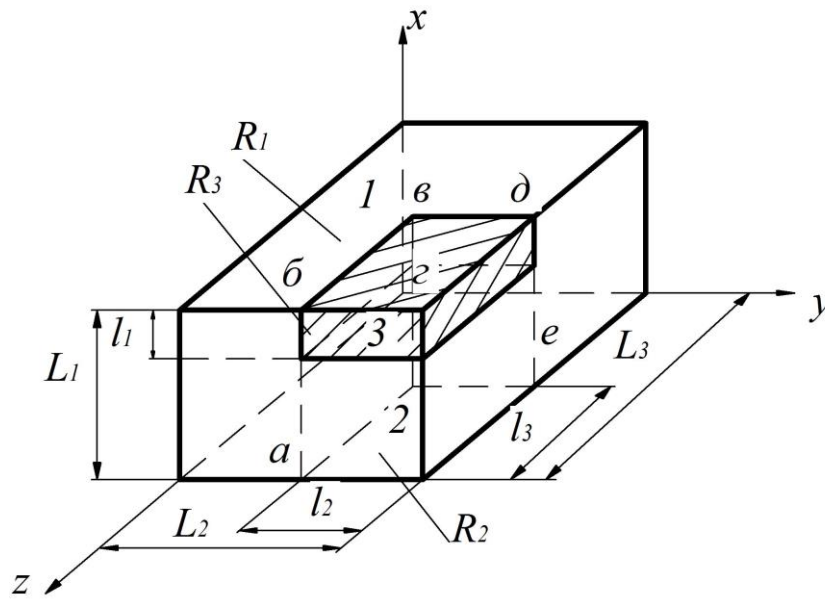


Рис. 12. Анізотропна структура елементарної бінарної ячійки з компонентами металевого бортового кільця і гуми

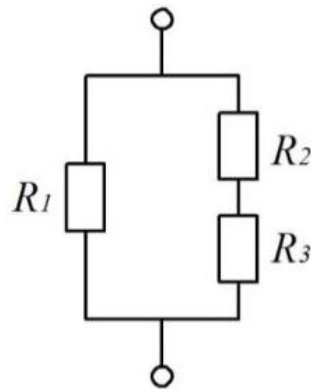


Рис. 13. Схема з'єднань теплових опорів

В зв'язку зі зміною концентрації компонентів в одиниці об'єму автошини вводиться поняття коефіцієнтів концентрації  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  по напрямках:

$$k_x = \frac{l_x}{L_x}, \quad k_y = \frac{l_y}{L_y}, \quad k_z = \frac{l_z}{L_z}. \quad (38)$$

в подальшому приймається, що  $k_y k_z = S$ , тоді:

$$R_{23} = \frac{L_x [k_x + \nu(1 - k_x)]}{\lambda_2 L_y L_z S}, \quad (39)$$

$$\text{де } \nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

Використовуючи (35), (36), і (39) знайдеться:

$$m_2 = 1 - S + \frac{vS}{k_x + v(1 - k_x)}. \quad (40)$$

Зв'язок між параметрами  $S$ ,  $k_x$  і об'ємною концентрацією  $m_2$  визначається як:

$$m_2 = \frac{v_2}{v} = k_x k_y k_z = k_x S, \quad (41)$$

тоді  $S = \frac{m_2}{k_x}$ , якщо  $S \leq 1$ , то  $k_x \geq m_2$ .

З урахуванням (41) формула (40) виглядає наступним чином:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 - \frac{m_2}{k_x} + \frac{vm_2}{k_x [k_x + v(1 - k_x)]}. \quad (42)$$

Формула (43) задовольняє наступні граничні переходи:

1. У разі відсутності бортових кілець  $k_x=0$ , тоді  $\lambda=\lambda_1$  теплопровідності термoplastичної гуми (варіант 1).

2. В разі коли коефіцієнт концентрації компоненту бортових кілець  $k_x=1$  тоді  $m_2=1$  і загальна теплопровідність буде відповідати компоненту бортових кілець  $\lambda=\lambda_2$ .

3. При однаковій теплопровідності двох компонентів  $v=1$ ,  $\lambda=\lambda_1=\lambda_2$ .

4. При  $S=1$ , бортові кільця можна розглядати як суцільні пластини, паралельні тепловому потоку, якщо  $k_x=1$  бортові кільця в перетині утворюють прямокутники розташовані перпендикулярно тепловому потоку, в цьому випадку формула (42) буде відображати найбільший чи найменший ефект теплопровідності двохкомпонентної ущільненої маси автошин:

$$\lambda = 1 - \frac{\lambda_2}{vm_1 + (1 - m_1)}; \quad \lambda = \lambda_2(1 - m_1) + \lambda_1 m_1. \quad (43)$$

5. Якщо  $k_x=k_y=k_z=k$ , то  $k=m_2^{1/3}$ , компоненти набувають форми куба, а формула (42) перетворюється в наступний вид:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{v - (v - 1)(1 - m_2^{\frac{2}{3}})m_2^{\frac{1}{3}}}{v - m_2^{\frac{1}{3}}(v - 1)}. \quad (44)$$

Представлена формула теплопровідності анізотропної структури елементарної бінарної ячійки з компонентами металевого бортового кільця і гуми до-



зволяє визначити теплопровідність масиву, структура якого найбільш реалістична, в процесі піролізу цілих автошин, поєднаного з дією на них статичного навантаження.

## 6. Обговорення результатів дослідження теплопровідності в середині реактора

Розрахунки узагальненої теплопровідності ущільненого двокомпонентного масиву автошин в реакторі за розробленою методикою не виявили обмежень на довжину і товщину шару зв'язуючої термопластичної гуми, оточуючої бортові кільця.

На рис. 14 показані характеристики зміни загальної теплопровідності бінарної ячійки в залежності від концентрації термопластичної гуми і сталі бортових кілець.

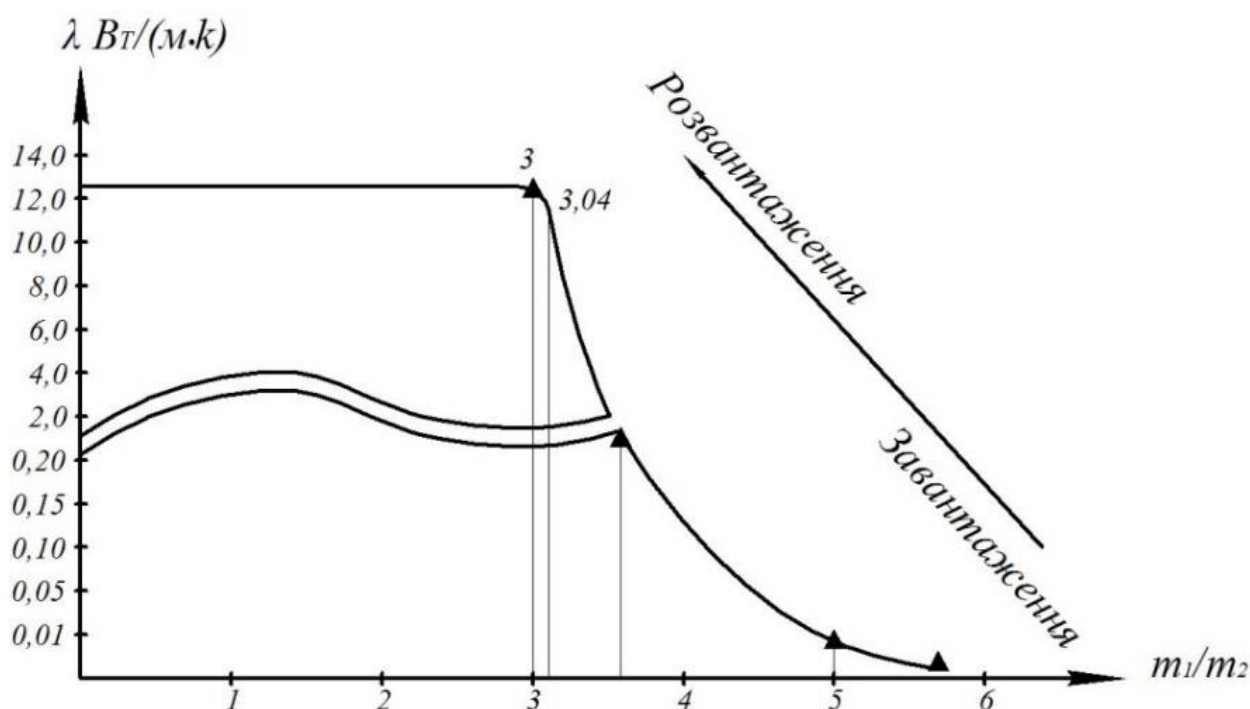


Рис. 14. Теоретичний уточнений розрахунок загальної теплопровідності анізотропної не симетричної структури бінарної ячійки в залежності від об'ємної концентрації компонентів (варіант 3)

Як видно із кривої, представленої на рис. 14, загальна теплопровідність масиву автошин під дією температури і статичного навантаження поступово збільшується (справа на ліво) відповідно, від моменту завантаження, зменшується об'єм газу (повітря) за рахунок стискання автошин і збільшується концентрація металевих бортових кілець і гуми. Збільшення теплопровідності масиву автошин відбувається по експоненціальному закону до моменту дотику бортових кілець один до одного і утворення теплового контакту між ними, далі до моменту розвантаження, участок кривої приймає горизонтальне положення і теплопровідність не збільшується незалежно від температури і величини стис-

кання. Збільшення загальної теплопровідності від збільшення концентрації сталі бортових кілець, похибка в розрахунках не перевищує 3 %.

## 7. Висновки

1. Проведені теоретичні дослідження загальної теплопровідності трьох вибраних анізотропних структур бінарних ячіюк доказали, що максимально наближеним до реалістичних умов є третій варіант з несиметричним розташуванням цілих автошин в піролізному реакторі. При цьому за рахунок збільшеної теплопровідності металевих бортових кілець, які під дією стискування знаходяться в тепловому контакті один з другим, утворюючи об'ємну конструкцію в середовищі гуми, забезпечується максимальну теплопровідність масиву цілих автошин всередині реактора.

2. Розроблена методика розрахунку теплопровідності різних структур бінарних ячіюк масиву цілих автошин в піролізному реакторі під дією одночасного статичного стискування і нагріву їх до температури піролізу гуми, забезпечує оптимізацію значення загальної теплопровідності масиву автошин в середині реактора за рахунок внеску величини теплопровідності металевих бортових кілець.

3. Проведені теоретичні дослідження впливу збільшеної теплопровідності металевих бортових кілець на загальну теплопровідність масиву цілих автошин в піролізному реакторі підтвердили збільшення значень з 1,8 Вт/(м·К) до 12,7 Вт/(м·К).

4. При моделюванні об'ємної решітки, утвореною бортовими кільцями і металокордом автошин, під дією статичного навантаження визначено оптимальне геометричне розташування цілих автошин відносно піролізного реактора, де діаметр реактора більший за діаметр автошин мінімум в 1,5 разів. При цьому автошини разом з бортовими кільцями зміщуються один відносно другого в горизонтальній площині.

5. Отримані розрахункові значення теплопровідності масиву цілих автошин в піролізному реакторі при оптимальному розташуванні сировини та коефіцієнті заповнення до 98 % дають можливість оптимізувати конструктивні характеристики піролізного обладнання.

## Література

1. Патент України на винахід, кл. F23G5/24, F23G5/027, C08J11/04, C10G1/10, C10B53/07. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин [Текст] / Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В., Крива М. С. – № 110678; заявл. 06.10.2014; опубл. 25.01 2016, Бюл. № 2.

2. Bekhiti, M. Properties of Waste Tire Rubber Powder [Text] / M. Bekhiti, H. Trouzine, A. Asroun // Engineering, Technology and Applied Science Research. – 2014. – Vol. 4, Issue 4. – P. 669–672.

3. Singh, B. Mechanistic Implications of Plastic Degradation [Text] / B. Singh, N. Sharma // Polymer Degradation and Stability. – 2008. – Vol. 93, Issue 3. – P. 561–584. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008

4. Скоромный, А. Л. Снижение энергозатрат на утилизацию изношенных автомобильных шин методом термохимической деструкции [Текст] / А. Л. Скоромный // Экология и промышленность. – 2008. – № 4. – С. 68–71.
5. Ким, К. К. Новый метод утилизации автомобильных шин с металлокордом [Текст] / К. К. Ким, И. М. Карпова // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 7. – С. 24–27.
6. Vovk, O. O. Environmental Safety Technology of Scrap Tires Treatment [Text] / O. O. Vovk, J. S. Nikitchenko, // Proceedings of The National Aviation University. – 2009. – Vol. 41, Issue 4. – P. 94–99. doi: 10.18372/2306-1472.41.1805
7. Кос, А. Studying the Utilization of Plastic Waste by Chemical Recycling Method [Text] / А. Кос // Open Journal of Applied Sciences. – 2013. – Vol. 3, Issue 1. – P. 413–420. doi: 10.4236/ojapps.2013.37051
8. Hujuri, U. Modeling Pyrolysis Kinetics of Plastic Mixtures [Text] / U. Hujuri, A. K. Ghoshal, S. Gumma // Polymer Degradation and Stability. – 2008. – Vol. 93, Issue 10. – P. 1832–1837. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.006
9. Сталинский, Д. В. Моделирование температурного состояния реактора термохимической деструкции изношенных автомобильных шин [Текст] / Д. В. Сталинский, А. Л. Скоромный, А. М. Синозацкий // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 1. – С. 58–66.
10. Разработка и моделирование установки для термической обработки горючих сланцев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://discollection.ru/article/27072009\\_kosova\\_ol\\_ga\\_jur\\_evna\\_93707/2](http://discollection.ru/article/27072009_kosova_ol_ga_jur_evna_93707/2)
11. Спосіб переробки полімерних складових зношених автомобільних шин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://findpatent.com.ua/patent/240/2402591.html>
12. Рыжков, С. С. Отработка пиролизной технологии утилизации органических отходов для морехозяйственного комплекса – системы подачи отходов в пиролизный реактор [Текст] / С. С. Рыжков, Л. Н. Маркина, Н. В. Рудюк, Ю. В. Заболотная // Судостроение и морская инфраструктура. – 2014. – № 2 (2). – С. 131–143.
13. Кирпичев, М. В. Моделирование тепловых устройств [Текст] / М. В. Кирпичев, М. А. Михеев. – М.: изд-во АН СССР, 1936. – 255 с.
14. Тябин, Н. В. Теплообмен [Текст] / Н. В. Тябин и др. // Советские исследования. – М.: Наука, 1974. – С. 195–198.
15. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов [Текст] / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.